

***А. В. Запалова<sup>\*</sup>, А. В. Бурнаев, М. А. Герман***

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)  
(МАИ), г. Москва

<sup>\*</sup>*anutkalask1994@mail.ru*

Научный руководитель – проф., канд. техн. наук *Д. Е. Гусев*

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СПЕКАНИЯ ИЗ СПЛАВА ВТ1-0

В работе проведено исследование изменения механических свойств пористого материала из титанового сплава в зависимости от температурных режимов спекания и термоводородной обработки (ТВО). Было выявлено, что с увеличением температур спекания улучшаются прочностные свойства и снижается пластичность. В работе приведено сравнение свойств образцов без ТВО и с его применением.

*Ключевые слова:* пористый материал, титан, спекание, термоводородная обработка, механические свойства.

***A. V. Zapalova , A. V. Burnaev , M. A. German***

## RESEARCH OF MECHANICAL PROPERTIES OF POROUS MATERIALS OBTAINED BY SINTERING OF ALLOY VT1-0

In work the research of change of mechanical properties of porous material from titanic alloy, depending on temperature conditions of agglomeration and thermohydrogen processing (THP) is conducted. It has been revealed that with increase in temperatures of agglomeration strength properties improve and the plasticity decreases. Comparison of properties of samples without THP and with its application is given in work.

*Keywords:* a porous material, titanium, sintering, thermohydrogen processing, mechanical properties.

В настоящее время большое внимание уделяется получению пористых материалов. Они находят свое применение в различных отраслях производства в качестве фильтров в химической и нефтегазовой промышленности, тепло- и шумозащиты в машиностроении и в медицине для изготовления остеоинтеграционных материалов и покрытий имплантатов. В последнем случае к пористым материалам предъявляется ряд специфических требований таких как биологическая инертность и коррозионная стойкость, а так же комплекс необходимых механических характеристик близкий к характеристикам биологических тканей.

Наиболее полно заданным требованиям отвечают титановые сплавы, опережая стали и сплавы на основе кобальта. Поэтому в последние годы уделяется большое внимание получению пористых материалов на основе титана [1]. Такие изделия позволяют создать хорошую фиксацию имплантатов, за счёт прорастания живой ткани в поры материала, но их недостатком является снижение прочности. Поэтому наряду с обеспечением необходимой пористости и биосовместимости материалов актуальной задачей при работе с пористыми материалами является и разработка технологий, обеспечивающих возможность получения пористого материала на основе титана, компенсирующего потерю прочности из-за пористости.

Основными техническими проблемами при изготовлении пористых материалов и покрытий из титановых сплавов являются:

- обеспечение высокой объемной пористости и требуемого размера пор при спекании порошка или гранул;
- обеспечение прочности соединения между волокнами и монолитным имплантатом в случае использования волокон при спекании или диффузионной сварке [2].

Для решения вышеизложенных проблем получения пористых материалов наиболее перспективным является технологический процесс спекание волокон титана, полученных методом высокоскоростного затвердевания расплава (ВЗР) с последующей ТВО.

Назначение ТВО состоит в повышении прочности пористого материала в зонах спекания металлических волокон и повышении прочности материала волокна за счет увеличения дисперсности его структуры. Это достигается благодаря фазовым и структурным превращениям, осуществляемым по диффузионным механизмам во время ТВО[4–5].

В качестве объекта исследования использовалось волокно из сплавов ВТ1-0, полученное высокоскоростным затвердеванием расплава по методу экстракции висящей капли на установке ЭВКР-ЭЛУ [2]. Волокно прессовали в плоские образцы толщиной 5 мм и шириной 15 мм, длиной 55 мм. Далее их спекали в вакууме при температурах 850–1000 °С под давлением 0,2–0,5 МПа в течение 1–2 часов с помощью установки СВДУ-40. Объемную пористость в пределах 50–80 % задавали ограничением смещения пуансона.

Часть образцов подвергалась ТВО, которая заключалась в наводороживании в интервале температур 650–850 °С до концентрации 0,6–0,8 % водорода по массе термодиффузионным методом с последующей дегазации в процессе вакуумного отжига при тех же температурах в течение 2–4 часов.

Специфика предполагаемого применения пористого материала определяет требования к характеристикам работоспособности имплантатов из него и к методам определения механических параметров.

На первом этапе исследовали влияние температуры спекания и последующей ТВО на механические характеристики плоских образцов ПМ с пористостью  $50 \pm 2 \%$ .

Таблица

Влияние температуры спекания на механические характеристики при растяжении листового пористого материала до и после ТВО

Температура спекания, °C	Наличие ТВО	Механические характеристики		
		Максимальная прочность $\sigma_{\max}$ , Мпа	Относительное удлинение $\delta$ , %	
			при максимальной прочности	при разрушении
850	–	$25,6 \pm 13,3$	$2,6 \pm 0,8$	$13,5 \pm 1,5$
850	ТВО	$29,0 \pm 5,0$	$3,1 \pm 0,7$	$13,0 \pm 5,0$
900	–	$45,0 \pm 5,0$	$2,2 \pm 0,5$	$7,5 \pm 1,5$
900	ТВО	$88,1 \pm 11,2$	$2,5 \pm 0,1$	$8,5 \pm 0,5$
950	–	$48,5 \pm 5,5$	$1,5 \pm 0,3$	$7,5 \pm 1,0$
950	ТВО	$58,5 \pm 4,5$	$2,1 \pm 0,5$	$7,5 \pm 1,0$

Механическое поведение пористых материалов при испытаниях на растяжение характеризуется многочисленными перегибами и широким разбросом показателей прочности и пластичности. Это связано с разрушением контактов между отдельными волокнами без изменения формы образца, а так же сложной схемой деформации волокон в поровом пространстве. При деформациях более 5 % можно заметить появление свободных концов волокон, без фрагментации материала (рис. 1).

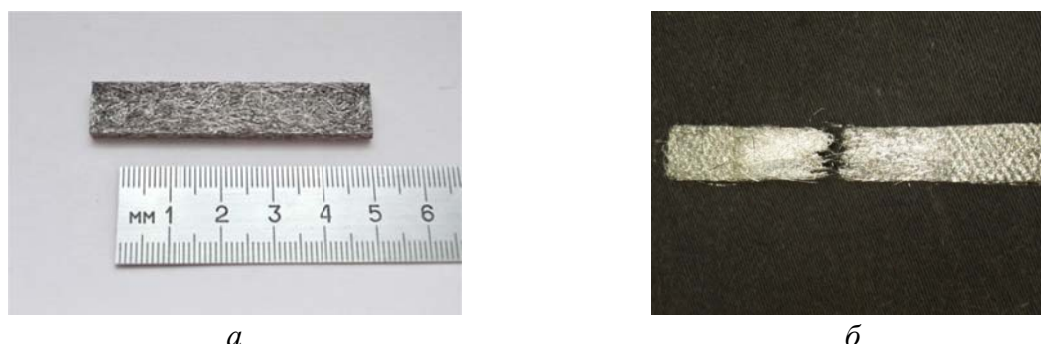


Рис. 1. Внешний вид образцов листового пористого материала: *а* – до испытания и *б* – после испытания на растяжение

Кривые деформации растяжения образцов можно разделить на несколько участков. На первом участке линейное возрастание нагрузки от

удлинения, характеризуется упругим поведением материала. Участок ограничивается усилием текучести и отвечающим ему упругим удлинением. Он определяет область работоспособности пористого материала с широким диапазоном жесткости от 5 до 12 ГПа. Это, по-видимому, определяется укладкой волокон в материале, которая носит достаточно широкий характер.

При последующей деформации пористого материала заметное замедление возрастания нагрузки, которая завершается формированием ярко выраженного максимума. На третьем участке деформации происходит снижение нагрузки. Можно заметить «скачкообразный» характер кривой, который определяется разрывом отдельных волокон материала. Образец может не претерпевать полного разрушения, даже при значительных удлинениях. Однако его существенное изменение формы можно оценить для расчета предельной деформации.

Для сравнительного анализа влияния режимов спекания и ТВО диаграммы растяжения были переведены в координаты напряжения-деформации на рис. 2.

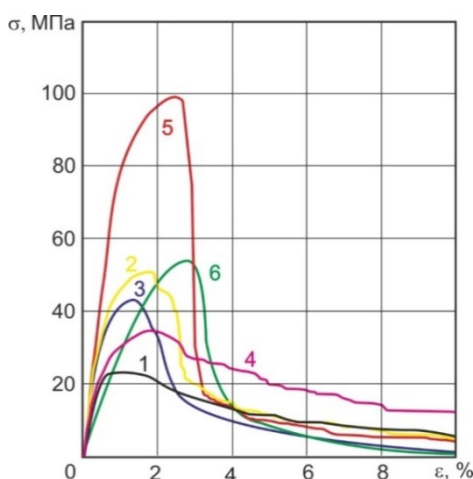


Рис. 2. Кривые растяжения образцов после разных режимов спекания и последующей ТВО: 1 – 850 °С, 1 час, 2 – 900 °С, 1 час, 3 – 950 °С, 1 час; 4 – 850 °С, 1 час + ТВО, 5 – 900 °С, 1 час + ТВО, 6 – 950 °С, 1 час + ТВО

Максимальная прочность образцов возрастает с ростом температуры спекания, а относительное удлинение при этой прочности и при потере геометрии образца – снижается. Необходимо отметить, что при температуре спекания 850 °С наблюдается наиболее значительный разброс значений механических характеристик, что свидетельствует о недостаточной прочности контактов волокон. При низких температурах спекания контакты волокон носят механический характер с выраженной поверхностной границей. Увеличение температуры обработки сопровождается преобразованием структуры и постепенным увеличением

доли физического контакта волокон, выражающимся в формировании общих зерен и исчезновении поверхностной границы. В тоже время при температуре спекания 950°C прочность практически не увеличивается, а пластичность заметно снижается. Это связано с интенсивным ростом  $\beta$ -зерна и наследованием его размеров  $\alpha$ -зерном, образующимся при охлаждении от температуры спекания.

В результате исследования был выявлен оптимальный режим обработки, включающий спекание при 900°C с последующей ТВО при котором наблюдается значительное увеличение прочностных свойств при достаточной пластичности. Проведение ТВО образцов спекания повышает прочностные и пластические характеристики и уменьшает их разброс в пределах партии образцов. При этом максимальное увеличение прочности (почти в 2 раза) происходит после спекания при температуре 900°C. Это связано с увеличением доли физического контакта волокон, образующегося из механических в процессе дополнительной двойной фазовой перекристаллизации материала при наводороживании и дегазации пористого материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сравнительное исследование проницаемых материалов из металлических порошков и волокон / А. Г. Косторнов [и др.] // Порошковая металлургия. 1983. № 3. С. 49 – 51.
2. Шмелев, Л. С. Производство пористых листов из металлических порошков / Л. С. Шмелев, В. К. Сорокин, Н. В. Гуреев // Сталь. 1983. № 5. С. 82 – 83.
3. Использование термоводородной обработки при изготовлении пористых материалов и изделий из титановых волокон и проволоки / М.Ю. Коллеров [и др.] // Металлург. 2015. № 3. С. 61 – 66.
4. Водородная технология титановых сплавов / А. А. Ильин [и др.]. Москва : МИСИС, 2002. 392 с.
5. Особенности формирования структуры титана при термодиффузионном насыщении водородом / М. Ю. Коллеров [и др.] // МиТОМ. 2016. № 6. С. 25 – 29.